

전기차 화재 대응을 위한 주행 시뮬레이터 기반 안전 대피 인터페이스 연구

이 호 준¹⁾ · 홍 사 라²⁾ · 양 지 현³⁾

국민대학교 자동차산업대학원 자동차공학과¹⁾ · 국민대학교 자동차모빌리티대학원²⁾ · 국민대학교 자동차공학과³⁾

A Simulator Study on the Safe Evacuation Interface for Electric Vehicle Fire Incidents

Hojun Lee¹⁾ · Sara Hong²⁾ · Ji Hyun Yang^{*3)}

¹⁾Graduate School of Automotive Industry, Kookmin University, Seoul 02707, Korea

²⁾Graduate School of Automobile and Mobility, Kookmin University, Seoul 02707, Korea

³⁾Department of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 02707, Korea

(Received 2 April 2024 / Revised 12 August 2024 / Accepted 14 August 2024)

Abstract : Electric vehicle (EV) fires are rising with the growth of EVs. As manual driving decreases due to automated driving system technological advancement, responding to EV fires could even become more challenging, which may affect passenger safety. This study explored a safety evacuation interface that provides visual, auditory, and haptic warnings during such emergencies to facilitate vehicle control and evacuation. To evaluate the effectiveness of the investigated safety evacuation interface, a human-in-the-loop experiment was conducted using a driving simulator with 33 participants, where data on driving behavior and survey responses were collected. The results indicate that the safe evacuation interface leads to a lower steering reversal rate and a higher sense of stability, situational awareness, and reduced stress compared to the condition without the safety evacuation interface. This research highlights the potential of escape assistance systems in enhancing rapid evacuation during EV fires, providing a comprehensive basis for further research.

Key words : Driver-vehicle interaction(운전자-차량 상호작용), Driving simulator(주행 시뮬레이터), Electric car fire(전기차 화재), Safe evacuation interface(안전 대피 인터페이스), Warning(알림)

1. 서론

최근 수년간 전기차 보급이 급속도로 확대되면서 전기차 화재가 3년 만에 3배 수준으로 확대되었으며, 2020년 이후 지난달까지 전기차 화재는 누적 94건 발생한 것으로 집계됐다.¹⁾ 전기차 배터리의 열폭주는 화재가 발생하기 전 특정 배터리의 열화로 시작하여 배터리 내부의 리튬과 유기용매 반응으로 인해 가연성 탄화수소 가스(오프가스)를 배출하고 열폭주가 진행된다. 이는 전기차 화재 발생 전 전조 현상으로 나타난다.²⁾ 현재까지 전기차 화재 대응에 대한 연구는 화재 진압 방법이나 전기차 배터리 화재 위험 분석에 중점을 두고 있지만, 전기차 화재 발생 전 운전자의 안전을 지키기 위한 경고 시스템이나 탈출 보조 시스템에 관한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 안전 대피 인터페이스의 사용 여부에

따른 운전자의 차량 제어와 운전자 반응을 측정하고, 대피 시간 및 조향 데이터를 분석하여 대피 방안을 제시한다. 화재 발생 전 운전자의 대피 능력을 향상시킬 수 있는 시스템을 도입함으로써 전기차 화재 시 빠른 대피를 지원하는 탈출 보조 시스템에 대한 기초 연구로 전기차 화재 대피 연구를 위한 기반을 확립하고자 한다.

2. 선행연구

Kim과 Yang³⁾은 시각, 청각, 촉각 단일 모달리티 알림과 시각, 청각, 촉각을 조합한 멀티모달리티 알림에 대한 연구를 진행하였으며, 연구 결과 청각 및 촉각 모달리티를 포함한 알림이 제어권 전환에서 효과적인 결과를 제시했다.

이지원 등⁴⁾의 연구는 NHTSA 가이드라인을 참고하여

*Corresponding author, E-mail: yangjh@kookmin.ac.kr

[†]This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

차량 인터페이스에 관한 이전 연구와 OEM 사례를 분석한 뒤, 단일 모달리티 알람 방법을 제안하였다. 검증을 위해 청각 및 촉각 단일 알람을 사용하여 제어권 전환 반응시간을 비교하였다. 연구 결과, 청각 알람은 이어콘이 제어권 전환 부분에서 다른 청각 알람보다 통계적으로 더 빠른 반응 시간을 유발하는 것으로 나타났다. 촉각 알람은 시트 내 진동 발생 위치의 반응 시간은 유의미한 차이를 발견하지 못하였다. 또한 진동 주기의 반응시간에서는 통계적인 유의성을 찾지 못하였지만, 평균값을 비교하면 켜짐과 꺼짐이 반복되는 동적 진동이 정적인 진동에 비해 반응시간을 높이는 결과를 제시하였다.

홍사라 등⁵⁾은 청각 알람 방법을 사용자의 행동 관점에서 분석하였으며, 청각 알람을 분석한 결과 이어콘 알람이 제어권 전환 상황에서 조작 시간과 인지 시간을 빠르게 한다는 결과를 얻었다. 이는 제어권 전환 시 이어콘 알람은 상황을 빠르게 대처하고 인지했음을 알 수 있다.

Petermeijer 등⁶⁾ 연구에서는 제어권 전환 알람 실험에서 단일 알람과 멀티모달 알람을 비교하여 가장 효과적인 알람을 찾기 위한 연구를 수행했다. 그 결과, 시각 알람이 긴급한 상황을 전달하는 데 효과적인 것으로 나타났다. 시각, 청각, 및 촉각의 멀티모달 조합이 단일 시각 알람보다 효과적이라는 결론이 도출되었다.

Politis 등⁷⁾ 연구에서는 제어권 이양 또는 제어권 전환 시나리오에 사용되는 멀티모달 신호를 평가했다. 이 연구에서 청각 알람은 여성의 음성을 사용했다. 연구 결과, 멀티모달 경고가 단일 시각 경고보다 제어권 전환 시간과 정확성 측면에서 더 효과적임을 확인했다. 또한, 촉각 모달리티 알람을 통한 제어권 전환 성공률을 비교하는 연구에서 단일 멀티모달 알람을 받았을 때 제어권 전환이 더 뛰어나다는 결론이 도출되었다.

권주영 등⁸⁾ 연구에서는 자율주행 2단계와 3·4 단계 주행 조건에 따른 참가자의 선호도를 파악하기 위해 주행 시뮬레이터를 활용하여 실험을 진행했다. 연구 과정에서 참가자에게 ‘디스플레이 터치’, ‘수동 주행’, ‘자율주행’과 같은 작업을 부여하고, 센터페시아 디스플레이의 크기와 위치별로 실험 대상자가 다양한 경험을 할 수 있도록 하였다. 연구 결과, 자율주행 2단계 시나리오에서 ‘상단 위치 가로형 디스플레이’가 시야의 이동이 멀지 않아 필요한 주행 정보를 충분히 제공할 수 있다는 결과를 제시하였다.

앞에서 서술한 것과 같이, 시각, 청각, 촉각 모달리티 알람을 사용하여 제어권 전환 알람을 제공한 연구가 국내외로 진행되었다. 제어권 전환은 자율주행 상황에서 운전자가 긴급한 상황에 직면하여 제어권이 운전자에게 이양될 때, 시각, 청각, 촉각 알람을 활용함으로써 빠른

반응시간과 높은 효율의 제어권 전환이 가능하다는 것을 확인하였다. 본 연구는 제어권 전환 알람인 시각, 청각, 촉각 모달리티를 조합한 멀티모달 알람의 선행 연구를 참고하여 전기차 화재 상황에서의 긴급한 상황에서 시각, 청각, 촉각 모달리티를 조합하여 운전자가 안전하게 대피할 수 있는 안전 대피 인터페이스를 설계하였다.

3. 실험 설계

3.1 실험 가설

- H₁: 안전 대피 인터페이스 사용 시 대피시간과 안전 대피 인터페이스 미사용 시 대피시간의 차이가 있다.
- H₂: 안전 대피 인터페이스 사용 시 대피시간과 안전 대피 인터페이스 미사용 시 차량 조향 반전율의 차이가 있다.
- H₃: 안전 대피 인터페이스 사용 시 차량 조향각 편차와 안전 대피 인터페이스 미사용 시 차량 조향각 편차의 차이가 있다.
- H₄: 안전 대피 인터페이스 사용 여부에 따라 사용자 평가 (주행 안정감, 주변 상황 인지, 주의 집중력, 스트레스)의 차이가 있다.
- H₅: 안전 대피 인터페이스의 시각, 청각, 촉각 알람에 따라 선호도 차이가 있다.

3.2 독립변수

본 연구의 독립변수는 안전 대피 인터페이스의 사용 여부다. 주행 중 전기차 화재 경고 상황이 발생하면, 안전 대피 인터페이스는 시각, 청각, 촉각 인터페이스 기능으로 안전하고 신속하게 차량 대피를 할 수 있도록 설계된 인터페이스를 의미한다. 안전 대피 인터페이스 미사용은 시각, 청각, 촉각 인터페이스의 도움 없이 차량을 대피하는 것을 의미한다.

본문 3.2.1 ~ 3.2.3에서는 안전 대피 인터페이스에 사용되는 시각, 청각, 촉각 인터페이스에 대해 설명한다. 3.2.4에서는 안전 대피 인터페이스를 사용하지 않는 조건에 대해 설명한다.

3.2.1 안전 대피 인터페이스 사용: 시각 인터페이스

권주영 등⁸⁾은 운전자의 시야 이동 거리를 최소화하고 필요한 주행 정보를 효과적으로 제공할 수 있는 최적 위치로는 상단 가로형 디스플레이를 선택하였다. 자율주행 2단계, 3·4단계 주행 조건에서 참가자의 선호도를 조사한 결과, 상단 위치에 가로형 디스플레이를 배치하는 것이 높은 선호도를 보였다. 상단 가로형 디스플레이는 전방 주시와 관련된 정보를 직관적으로 전달하며 시야 이동 거리를 최소화하여 필요한 주행 정보를 충분히

Table 1 Independent variables

Safety evacuation interface	Interface type	Context	Location	Specification
Used	Visual	The same view as the side mirror is provided at the center fascia position, with a wider angle than the side mirror	Center fascia	Size: 305 × 201 mm
Used	Auditory	When a vehicle is within a 10m distance and a 60-degree angle in the rearview, an earcon alarm is provided.	Dashboard above speaker	1,500 + 560 Hz, 70 dB(A)
Used	Haptic	When a vehicle is within a 10m distance and a 60-degree angle in the rearview, a haptic seat alarm is provided.	Back support and Seat pan	Period: 0.2 s(ON) / 0.05 s(OFF), Intensity: 1g
Not used	Visual	Safety Interface is not supported. The driver performs safety evacuation by looking at the side mirror.	Side mirror	-



Photo. 1 Visual interface

제공할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이로 인해 선택된 시각 인터페이스는 센터페시아에 위치하며, 기존의 사이드미러 화면보다 더 넓은 화각을 제공한다. 이를 통해 차선 변경 시 운전자에게 시각적인 도움을 보다 효과적으로 제공할 수 있도록 설계되었다(Photo. 1)(Table 1).

3.2.2 안전 대피 인터페이스 사용: 청각 인터페이스

홍사라 등⁵⁾의 연구에서는 시뮬레이터 실험을 통해 청각 알람의 종류에 따른 제어권 전환의 효과를 비교했다. 청각 알람을 사용자 행동 측면에서 분석한 결과, 이어콘(Earcons) 알람이 제어권 전환 상황에서 가장 빠르게 인지 시간과 조작 시간을 유도했다. 이러한 결과는 제어권 전환과 같은 위급한 상황에서 이어콘 알람을 사용하여 상황을 빠르게 인지시켰음을 나타낸다. 본 연구에서는 1차선에서 4차선으로 차선 변경을 시도할 때 후측방 차량이 10 m 이내, 60° 이내로 근접할 경우 1,500 + 560 Hz의 두 개의 톤이 합성된 이어콘 알람으로 “BEEP ~ BEEP” 소리가 발생하도록 설계하였다. 이로써, 청각적 도움을 통해 운전자가 차선 변경 시 후방 근접 상황을 신속하게 감지할 수 있도록 하였다.

3.2.3 안전 대피 인터페이스 사용: 촉각 인터페이스

홍사라 등⁵⁾은 제어권 전환 상황에서 시트 진동 세기 1 g와 2 g의 차이를 비교했다. 그 결과, 2 g 알람이 제어권 전환에 효과가 있다는 결론을 냈다. Kim과 Yang³⁾은 시각, 청각, 촉각 모달리티를 조합한 멀티 모달리티 알람을 제어권 전환 알람으로 사용했는데, 이때 시트 진동의 세기를 2 g로 설정하였다. 시뮬레이터 실험 결과, 제어권 전환 알람을 설계할 때 사용자의 불쾌감을 고려해야 하며, 2 g을 사용한 강한 촉각 진동에 대한 선호도가 낮았다. 이러한 선행 연구를 참고하여 운전자가 차선 변경을 시도할 때 시각+청각+촉각 알람이 동시에 제공되었을 때 발생할 수 있는 인지 부하를 최소화하기 위해 촉각 진동을 제일 약한 진동인 1 g으로 선택하였다. 발생 조건은 후측방 차량이 10 m, 60° 이내로 근접할 때, 엉덩이와 등받이 쿠션에 1 g의 진동이 0.2 s on, 0.05 s Off의 주기로 발생하며 청각 알람과 동일하다.

3.2.4 안전 대피 인터페이스 미사용

안전 대피 인터페이스의 미사용 시, 전기차 화재 경고 이벤트가 발생하면 음성 안내(“전기차 화재 경고 차량을 갓길로 주행하세요”), 아이콘, A필러, 촉각 진동을 10초 동안 발생하도록 설정하였다. 안전 대피 인터페이스 사용에 포함되어 있는 시각, 청각, 촉각 인터페이스는 제공되지 않으며 인터페이스의 도움 없이 사이드미러를 확인하며 차선 변경을 진행하며 갓길로 대피한다.

3.3 종속변수

3.3.1 대피시간(Evacuation Time, ET)

대피시간은 “전기차 화재 경고 차량을 갓길로 대피하세요”이벤트 경고가 발생하는 시점부터 갓길에 도착했을 때까지 소요되는 시간을 의미한다. 운전자는 1 ~ 4차

Table 2 Dependent variables

Category	Dependent variables (DV)	Unit	Description
Vehicle	Evacuation time (ET)	[s]	The time elapsed from the occurrence of the event warning to arriving at the narrow road
	Steering wheel angle deviation (SWD)	[degree]	Maximum deviation of steering wheel angle after TOR
	Steering wheel reversal rate (SRR)	[count/s]	Reversal rate of steering wheel angle when driver operates steering wheel more than 3 degrees
Survey	Stability	[point]	The driver's sense of stability during the safety evacuation process How much sense of stability did you feel when the system was used to evacuate the vehicle? - No sense of stability at all (1), Almost no sense of stability (2), Somewhat lacking in sense of stability (3), Neutral (4), Slightly felt a sense of stability (5), Felt a sense of stability (6), Felt a very strong sense of stability (7)
	Situational awareness	[point]	Driver's situational awareness during safety evacuation process When the system was used to evacuate the vehicle, please select how you felt about your awareness of the surrounding situation - Completely unaware (1), Almost unaware (2), Somewhat unaware (3), Neutral (4), Somewhat aware (5), Almost fully aware (6), Completely aware (7)
	Attention concentration	[point]	Driver's attention concentration during safety evacuation When the system was used to evacuate the vehicle, please select how you felt about your level of attention and focus - Completely unable to focus (1), Almost unable to focus (2), Somewhat unable to focus (3), Neutral (4), Somewhat able to focus (5), Almost fully focused (6), Completely focused (7)
	Stress	[point]	The level of stress felt by the driver during the safety evacuation process. When the system was used to evacuate the vehicle, please select how you felt about the level of stress - Felt very high stress (1), Felt high stress (2), Felt somewhat stressed (3), Neutral (4), Felt somewhat unstressed (5), Felt almost no stress (6), Felt no stress at all (7)
	Preference	-	Preference of visual, auditory, and haptic interfaces in safety evacuation interface systems Please select the type of interface you preferred the most - Visual interface, Auditory interface, Haptic interface

선으로 차선 변경을 통해 대피한 후 갓길에 도착했을 때 시간 측정이 끝난다. 빠른 대피 시간은 운전자가 시스템의 도움을 받아 차선 변경을 진행할 때 신속하게 판단하여 안전하게 대피했다는 것을 의미한다(Table 2).

3.3.2 조향각 편차(Steering Wheel Angle Deviation, SWD)

조향각 편차는 최대 스티어링 휠을 조향한 각도와 최소 스티어링 조향 각도의 차이의 절댓값으로 정의한다. 높은 SWD 값은 운전자가 스티어링 휠을 좌우로 크게 조향하여 주행 안정도가 불안하다는 것을 의미한다⁹⁾(Table 2).

3.3.3 조향 반전율(Steering Reversal Rate, SRR)

SRR은 초당 스티어링 엔드 값의 각도가 좌우로 3도 이상인 횟수를 의미한다. 높은 SRR 값은 운전자가 불안정하게 스티어링 휠을 좌우로 조향하여 주행 안정성이

낮아졌음을 의미한다^{10,11)}(Table 2). 본 연구에서는 SRR 지표를 통해 전기차 화재 경고 알람 이후 안전 대피 인터페이스 사용/미사용 조건에서 운전자의 차량 제어의 안정성을 평가하고자 한다.

3.3.4 설문 지표(Survey Indicator)

시나리오가 완료된 후 설문 평가를 통해 주행 중 운전자의 안정감(“시스템을 이용하여 차량을 대피시켰을 때, 안정감을 얼마나 느꼈습니까?”), 주변 상황 인지(“시스템을 이용하여 차량을 대피시켰을 때, 주변 상황 인지에 대한 느낀 점을 선택해 주세요”), 주의 집중력(“시스템을 이용하여 차량을 대피시켰을 때, 주의 집중력에 대해 느낀 점을 선택해 주세요”), 스트레스(“시스템을 이용하여 차량을 대피시켰을 때 스트레스를 얼마나 느꼈습니까?”) 네 가지의 항목을 7점 척도로 평가한다. 또한 사후 설문을 통해 실험하면서 제공받은 안전 대피 인터페이스

스의 시각, 청각 촉각 알림 중에서 가장 선호했던 알림을 평가했다(Table 2).

3.4 실험 시나리오

3.4.1 전기차 화재 경고(Electric Vehicle Fire Warning)

본 연구에서는 실험 참여자가 고속도로 1차선에서 ‘시속 100 km/h로 주행하세요’ 음성 메시지를 듣고 100 km/h의 속도를 유지하며 주행하던 중 전기차 화재를 미연에 감지하는 전기차 화재 경고 시스템이 작동하여 차량을 갓길로 대피하는 시나리오를 설계하였다. 현재 자동차 시장에 출시된 전기차는 BMS(Battery Management System)를 통해 실시간으로 고전압 시스템을 모니터링하고 있으며, 문제가 감지되면 클러스터에 “전기차 시스템을 점검하십시오”라는 아이콘 경고 알림이 표시된다. 그러나 이러한 경고 방식에는 운전자가 불꽃, 연기 등 시각적 또는 후각적 단서를 통해 차량의 문제를 인지하고 대응하는 데 시간이 오래 걸릴 수 있다는 문제점이 있다. 본 실험에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 화재 감지 시 A필러, 음성 안내, 촉각 진동 등 시각, 청각, 촉각 알림을 도입하여 10초 동안 경고 알림이 발생하도록 했다. 10초의 경고 알림 시간을 선정된 이유는 실험 참가자가 위

험 상황을 충분히 인지한 후 대피할 수 있도록 하기 위함이다. 이를 통해 운전자가 화재 전 상황을 신속하게 인지할 수 있는 전기차 화재 경고 시스템을 설계하였다. 이 경고 시스템은 운전자가 긴급 상황에서 시각, 청각, 촉각의 다양한 경고를 통해 전기차 화재 전 상황을 안내받고, 안전 대피 인터페이스 사용 여부를 경험하며 대피를 진행할 수 있도록 한다(Photo. 2).

3.4.2 주행 시나리오

실험 참가자는 안전 대피 인터페이스 사용, 미사용 두 가지 시나리오를 경험한다. 주행 환경은 경부 고속도로 내 버스전용 차로를 포함한 4차선의 신갈-오산 IC 구간(약 19 km)이다. 시나리오 시작 시, 실험 참가자는 ‘시속 100 km/h로 주행하세요’ 음성 메시지를 듣고 100 km/h의 속도에 맞춰 주행하게 된다. 주행 시작 후 약 300~340초가 경과되면 전기차 화재 경고가 발생한다. 이때, 실험 참가자는 하얀 실선으로 표시된 갓길까지 옆 차선의 트럭이나 차량을 확인하며 차선 이동을 3회 진행하여 차량을 대피한다. 이때 안전 대피 인터페이스 사용 시나리오는 본 실험의 독립변수인 시각, 청각, 촉각 인터페이스의 도움을 받아 차량을 대피하며 안전 대피 인터페이스 미사용 시나리오는 시각, 청각, 촉각 인터페이스의 도움 없이 사이드미러를 확인하며 차선 변경을 진행한다 실험 차량이 1차선 → 2차선 → 3차선 → 갓길까지 차량이 정착하여 속도가 0 km/h가 되면 시나리오가 종료된다(Fig. 1).



Photo. 2 Electric vehicle fire warning

3.5 실험 장비

본 연구에서는 국민대학교 차량인간공학실험실의 KMU-DS 차량 시뮬레이터를 활용했다(Fig. 2). 시뮬레이터는 현대 LF 쏘나타를 기반으로 한 Full-Scale 주행 시뮬

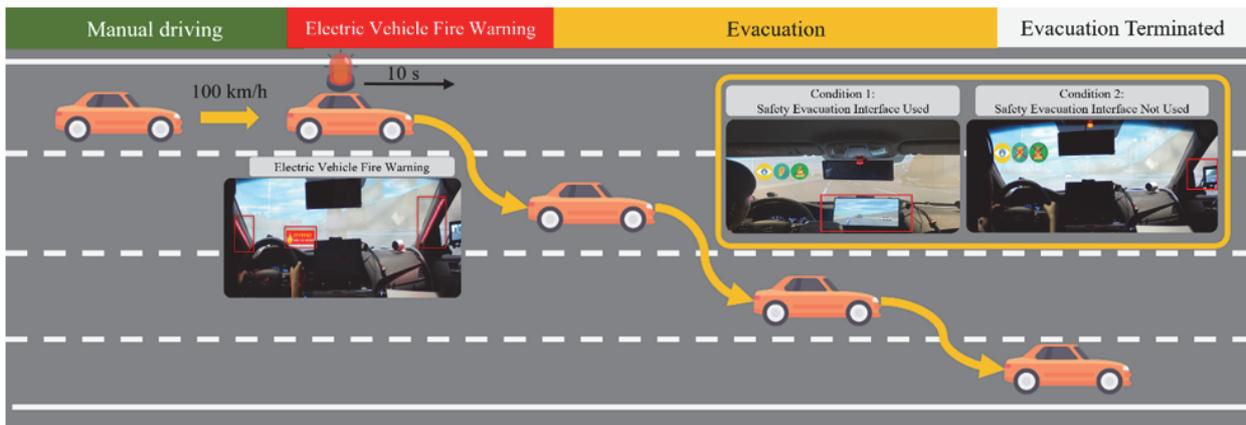


Fig. 1 Driving scenario

레이터이다. 시뮬레이터는 실험 참가자의 상황을 모니터링할 수 있는 메인 데스크, 도로 주행 환경을 스크린에 투사하는 영상 시스템으로 구성되어 있다. 뿐만 아니라, 시뮬레이터 내부에 설치된 CCD 카메라를 통해 실험 참가자의 상반신 및 페달 위치를 영상으로 확인하고 기록할 수 있다.

시뮬레이터의 소프트웨어는 AV Simulation 사의 SCANeR studio ver.2022.1을 활용하여 실험 환경을 구현했다. 이를 통해 이벤트 발생 시간, 운전자의 가속, 제동, 조향 데이터와 같은 차량 관련 지표를 수집할 수 있다. 이를 통해 이벤트 발생 시간, 운전자의 가속, 제동, 조향 데이터와 같은 차량 관련 지표를 수집할 수 있다.

3.6 실험 참가자

본 실험은 대한민국 운전면허 2종 보통 이상을 소지하고, 실제 운전 경력이 2년 미만인 20세에서 40세 사이의

성인 한국인 남녀를 대상으로 하였다. 총 33명의 참가자 중 데이터 기록 취득 오류로 인해 3명의 데이터를 제외하여 30명의 데이터를 수집하였다. 이들 참가자의 평균 연령은 25세이며(표준편차 2.7세). 성비는 남성 15명, 여성 15명으로 1:1 비율이다. 본 실험은 국민대학교 생명윤리 위원회(IRB)의 승인을 받아 진행하였으며 생명윤리 위원회의 규정을 준수하였다(KMU-202307-HR-368)(Table 3).

3.7 실험 절차

실험 진행자는 연구 대상자에게 실험 목적, 예상 시간, 보상 절차 등 연구 대상자 권익에 대한 충분히 설명하고 실험 중 멀미나 불안 증상이 발생하거나 다른 불편한 경우가 생길 시 언제든지 실험을 중단하고 포기할 수 있으며, 이로 인해 불이익이 생기지 않는다는 것을 설명하였다. 연구 대상자는 연습 주행을 통해 시뮬레이터 환경에 적응하도록 하였다. 실험 감독관은 스티어링휠, 액셀 페달, 브레이크 페달 사용 방법 등을 연구 대상자에게 설명하고, 안전 대피 인터페이스를 활용하여 차선 변경 연습을 진행한다. 이를 위해 연구 대상자는 차량 조작에 대해 숙지한다. 연습 주행 종료 후 실험 참가자는 안전대피 인터페이스 사용/미사용 시나리오를 2회 주행한다. 시나리오의 순서는 무작위 순서로 경험하도록 하였다. 2개의 시나리오 주행이 종료된 이후 실험 참가자는 차량 시뮬레이터에서 하차하여 설문 조사를 통해 안전 대피 상황에 대한 안정감, 주변 상황 인지, 주의 집중력, 스트레스 네 가지의 항목을 평가한다. 또한, 안전 대피 인터페이스에 사용된 시각, 청각, 촉각 알림에 대한 선호도 설문을 진행한다(Fig. 3).

Table 3. Participant information

Category	Details
Number of participants	33 (valid data: 30)
Gender	Male: 15 (50 %) Female: 15 (50 %)
Age	Mean: 25 years Standard deviation: 2.7 years
Driving experience	Less than 6 months: 14
	6 months to less than 1 year: 4
	1 year to less than 2 years: 7
	2 years: 5

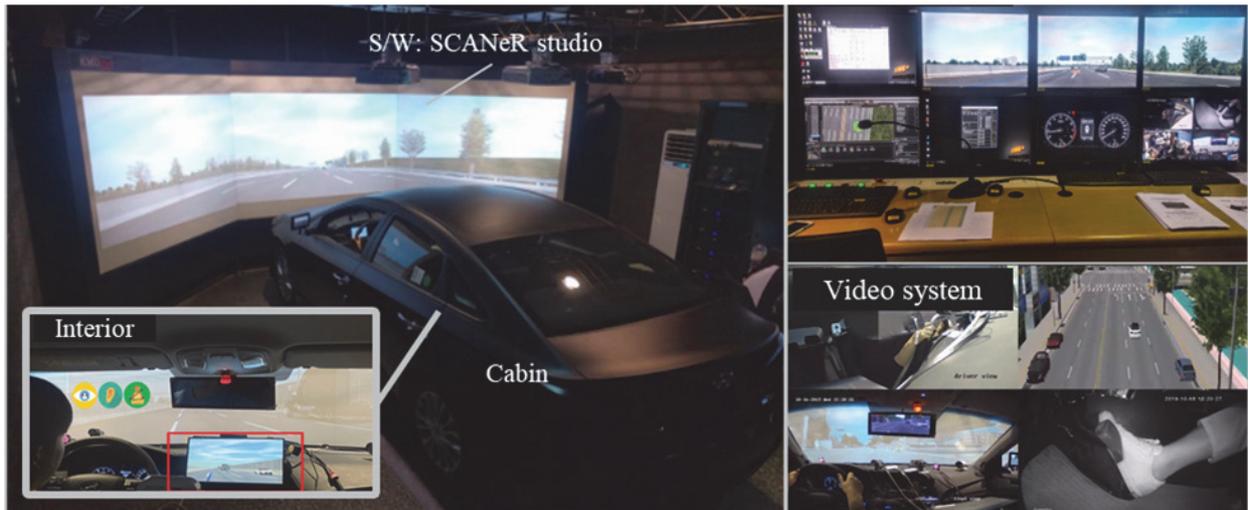


Fig. 2 Experimental equipment

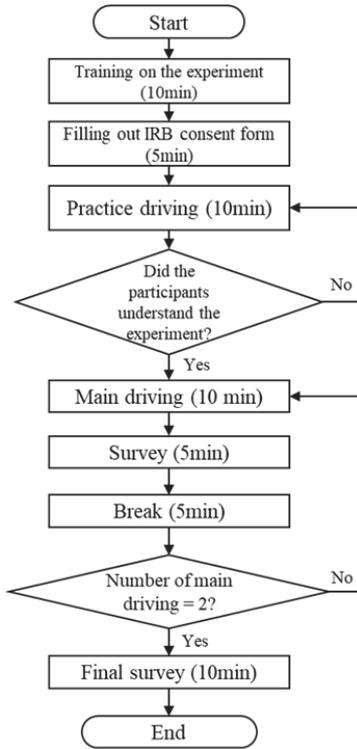


Fig.3 Experimental procedure

4. 실험 결과

4.1 분석 방법

정량 지표는 안전 대피 인터페이스 유무에 따른 대피 시간, 조향 반전율, 조향각 편차를 차량 시뮬레이터를 통해 데이터를 취득하고 도출된 데이터는 Matlab, SPSS 26을 이용하여 t-test 검정을 수행했다.

정성지표는 안전 대피 인터페이스의 사용 여부에 따라 안정감, 주변 상황 인지, 주의 집중력, 스트레스 네 가지 항목을 평가하기 위해 SurveyMonkey를 통해 사후 설문을 진행하여 안전 대피 인터페이스 유무에 따른 데이터를 수집하였다. 이를 분석하기 위해 SPSS 26을 이용하여 추론 통계 t-test 통계 검정을 실시하였으며, 안전 대피 인터페이스의 시각, 청각, 촉각 알림에 대한 선호도 설문 데이터를 막대그래프로 시각화했다.

4.2 차량 지표

4.2.1 대피시간(Evacuation Time, ET)

안전 대피 인터페이스 유무에 따른 통계분석 결과는 Table 4, Fig. 4와 같다. 안전 대피 인터페이스 사용의 평균 대피시간은 25.06 s(표준편차: 6.39 s), 미사용의 평균 대피시간은 24.69 s(표준편차: 7.11s) 이었다. SPSS 26을 이용하여 대응 표본 t-test 통계 검정 결과, 안전 대피 인

Table 4 Mean, standard deviation, and p-value of: Evacuation Time

Evacuation time [s]	Used	Not used
Mean (SD)	25.06 (6.39)	24.69 (7.11)
p-value	0.823	

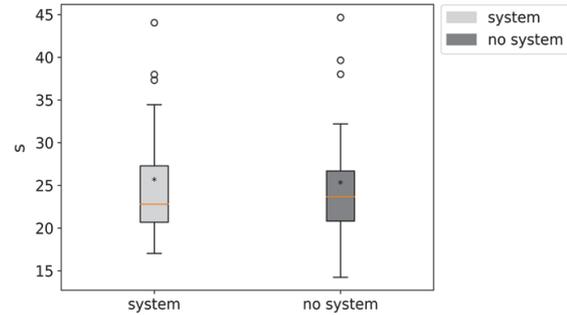


Fig. 4 Boxplot of evacuation time

터페이스 유무에 따른 대피 시간의 유의한 차이는 없었다($p=0.823$)(Table 4, Fig. 4).

4.2.2 조향각 편차(Steering Wheel Angle Deviation, SWD)

본 연구에서 조향각 편차(Steering Wheel Angle Deviation, SWD)는 차량이 갓길까지 대피할 때 대피 종료 이전의 구간을 2초 구간으로 나누어 (대피 종료 ~ 대피 종료 전 2초 / 2초 ~ 4초 / 4 ~ 6초 / 6 ~ 8초 / 8 ~ 10초) 조향 핸들을 극단적으로 조향한 최대와 최소 각도의 차이를 평가하여 주행 안정도를 확인하였다. 조향각 편차의 데이터를 SPSS 26을 이용하여 대응 표본 t-test 통계 검정 결과 모든 구간의 조향각 편차의 유의한 차이는 없었다(Table 5, Fig. 5).

4.2.3 조향 반전율(Steering Reversal Rate, SRR)

본 연구에서 조향 반전율(Steering Reversal Rate)은 스티어링 엔드 값의 각도가 좌우로 3도 이상일 때 기록되었다. 스티어링 휠이 좌우로 3도 이상 자주 움직이는 것은 운전자가 핸들을 불안정하게 조작하고 있음을 의미한다. 전기차 화재 경고 알림 이후 차량 대피 상황에서 실험 참가자의 결정 지연 및 판단력 저하 등이 조향 반전율에 미치는 영향을 파악하여 차량 제어 능력을 평가한다. 대응 표본 t-test 통계 검정 결과, 대피 종료 전 8 ~ 10초 구간에서 안전 대피 인터페이스 사용 여부에 따른 조향 반전율의 유의미한 차이가 있었다($p=0.037$). 안전 대피 인터페이스를 사용한 시나리오의 조향 반전율의 평균은 13.37 count/s으로, 안전 대피 인터페이스를 사용한

Table 5 Mean, standard deviation, and p-value of SWD

SWD [degree]										
Range	End ~ 2 s		2 ~ 4 s		4 ~ 6 s		6 ~ 8 s		8 ~ 10 s	
Utilization of safety evacuation interface	Used	Not used	Used	Not used	Used	Not used	Used	Not used	Used	Not used
Mean (SD)	7.33 (9.09)	8.11 (8.00)	10.51 (6.60)	12.5 (11.63)	12.26 (6.82)	14.50 (12.75)	13.71 (8.53)	15.26 (13.98)	13.37 (7.80)	14.19 (13.52)
p-value	0.633		0.278		0.408		0.625		0.741	

Table 6 Mean, standard deviation, and p-value of SRR

SRR [count/s]										
Range	End ~ 2 s		2 ~ 4 s		4 ~ 6 s		6 ~ 8 s		8 ~ 10 s	
Utilization of safety evacuation interface	Used	Not used								
Mean (SD)	0.16 (0.37)	0.26 (0.51)	0.70 (0.69)	0.60 (0.66)	0.80 (0.70)	0.60 (0.66)	0.50 (0.56)	0.73 (0.62)	0.50 (0.56)	0.80 (0.81)
p-value	0.326		0.522		0.161		0.129		0.037	

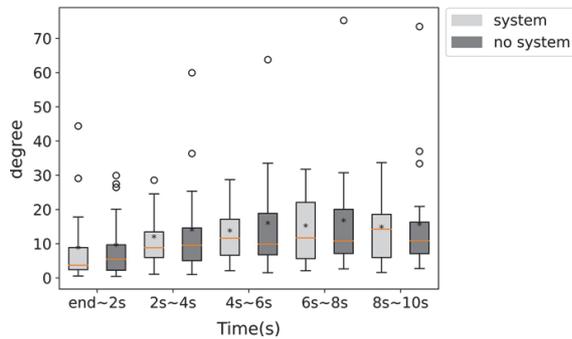


Fig. 5 Boxplot of steering wheel angle deviation

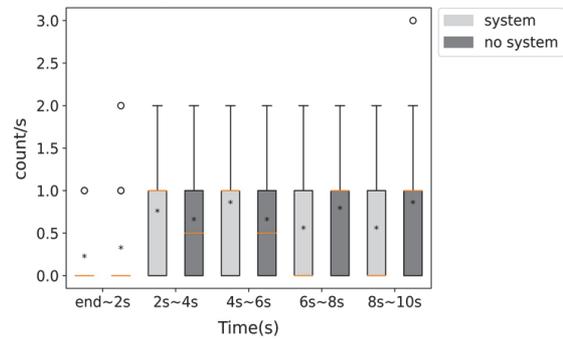


Fig. 6 Boxplot of steering reversal rate

지 않는 시나리오의 조향 반전율인 14.19 count/s보다 더 낮았다. 이는 안전 대피 인터페이스를 사용하는 조건에서 운전자가 차선 변경 중 스티어링 휠을 더 안정적으로 제어한다는 것을 의미한다(Table 6, Fig. 6).

4.3 설문 지표(Survey Indicator)

시나리오 완료 후, 운전자의 체감 반응을 측정하기 위해 SurveyMonkey를 활용하여 사후 설문을 진행한다. 실험 참가자들은 안전 대피 인터페이스 사용, 미사용 시나리오에서 차선 변경을 통해 차량을 대피할 때 주행 중 느꼈던 ‘안정감’, ‘주변 상황 인지’, ‘주의 집중력’, ‘스트레스’ 네 가지 항목을, 설문조사를 통해 평가하였다. SPSS 26을 활용하여 수행한 대응 표본 t-test 통계 검정 결과,

안전 대피 인터페이스를 사용했을 때 안정감($p=0.001$), 주변 상황 인지($p<0.001$), 주의 집중력($p=0.012$)이 유의미한 차이를 보였다. 평균값을 비교한 결과, 안전 대피 인터페이스를 사용했을 때 운전자의 안정감, 상황 인지, 주의 집중력이 높았다. 반면 스트레스의 유의미한 차이는 없었다($p=0.209$)(Table 7, Fig. 7).

4.3.1 안전 대피 인터페이스 선호도 조사

시나리오가 완료된 후, 운전자가 경험했던 안전 대피 인터페이스에서 SurveyMonkey를 통해 시각:13인치 센터페시아 디스플레이, 청각: BEEP ~ BEEP 이어콘 알람, 촉각: 등받이+엉덩이 진동 시트 중 ‘가장 선호한 감각의 알람을 선택해 주세요.’의 선호도 조사를 실시한다. 실험

Table 7 Mean, standard deviation, and p-value of survey indicator

Survey								
Category	Stability		Situational awareness		Concentration		Stress	
Utilization of safety evacuation interface	Used	Not used	Used	Not used	Used	Not used	Used	Not used
Mean (SD)	5.00 (1.44)	3.00 (1.08)	5.00 (1.52)	3.00 (1.43)	5.00 (1.61)	3.00 (1.31)	4.00 (1.43)	4.00 (1.78)
p-value of: Survey	0.001		<0.001		0.012		0.209	

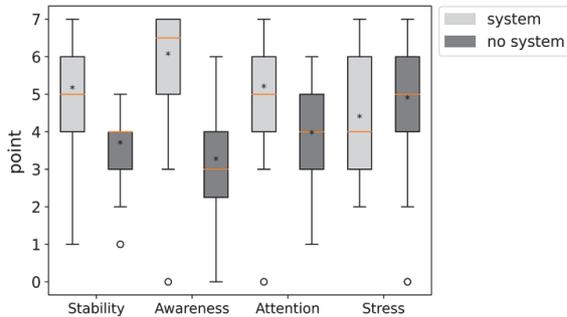


Fig. 7 Boxplot of survey indicator

참가자는 시각, 청각, 촉각 알림을 모두 선택할 수 있으며 만약 선호하는 알림이 없다면 선택하지 않을 수 있다. 설문조사 결과 알림에 대한 미응답자는 없었으며, 시각 18명(60%), 촉각 17명(57%), 청각 16명(53%)의 평가로 시각 알림이 가장 선호되었다.

5. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 시뮬레이터 실험을 통해 전기차 화재 상황에서 안전 대피 인터페이스가 주행 안정성 및 긴급 상황 대처 능력에 미치는 영향에 대해 연구했다. 실험 결과, 안전 대피 인터페이스 사용에 따른 대피 시간의 유의미한 차이는 없었다. 이는 안전 대피 인터페이스 사용 여부와 상관없이 A필러, 음성 안내, 촉각 진동을 통해 운전자에게 화재 경고 알림이 제공했기 때문으로 보인다. 이는 대피 시간은 안전 대피 인터페이스보다는 화재 경고 알림에 더 많은 영향을 받을 것으로 예상되며, 향후 화재 경고 알림의 스펙에 대한 연구가 진행될 수 있음을 의미한다. 그러나 이러한 안전 대피 인터페이스는 안정적인 차량 제어를 통해 사고를 방지하는 데 도움을 줄 수 있을 것으로 예상된다. 실험 결과, 안전 대피 인터페이스 미사용 조건에 대비해서, 안전 대피 인터페이스를 사용한 경우 차량 대피 중 조향 반전율이 낮았다. 또한, 설문 지표에서도 안전 대피 인터페이스 사용 조건에서 높은 안정성, 주변 상황 인지, 그리고 집중도를 보였으며, 이는 안

전 대피 인터페이스 사용 시 운전자의 안정적인 차량 제어, 사용성이 높았음을 의미한다. 그러나, 본 연구에서 시뮬레이터 환경의 한계로 차량에서 하차하는 시간을 대피 시간으로 고려하지 못했다. 향후 연구에서는 안전한 대피뿐만 아니라, 차량에서 탈출하는 상황을 고려한 탈출 보조 시스템에 대한 연구가 필요하다.

향후 다음과 같은 연구가 진행될 수 있다.

- 1) 현재 자동차 시장에서 경고 알림인 BMS(Battery Management System) 경고와 본 실험에서 사용한 시각, 청각, 촉각이 포함된 전기차 화재 경고와 비교하여 인지 판단 능력, 대피 수행 능력에서 얼마나 빠른 반응을 보이는지 연구를 진행할 수 있다.
- 2) 30대와 40대의 고령자와 같이 운전 경력이 많은 실험 참가자를 모집하여, 주변 상황을 여유롭게 확인할 수 있고 긴급 상황에서 안전 대피 인터페이스에 대해 충분히 인지하고 사용할 수 있는 다양한 참가자를 모집할 수 있다.
- 3) 추후 연구에서는 생체 신호나 시선 정보를 추가로 활용하여 사이드미러와 센터페시아 디스플레이 의존도 평가와 같은 실험을 진행하여 행동 원인 분석 결과에 신뢰성을 더할 수 있을 것으로 사료된다.
- 4) 본 연구는 전기차 화재 상황에서 안전 대피 인터페이스를 설계하고 평가하기 위해 화재 발생 10초 전에 운전자에게 전기차 화재 경고를 제공한다는 시나리오를 가정하고 실험을 설계했다. 향후에는 화재 감지 센서의 임계값을 고려한 전기차 화재 경고 시간 및 알림 방법에 대한 연구가 수행될 것으로 예상된다.
- 5) 전기차 배터리의 열폭주로 인한 화재 위험은 발화전 오프가스의 배출로 항상 전조증상이 나타난다. 이러한 위험을 사전에 감지하고 대응하기 위해 실제 차량에서 경고 알림을 구현하는 연구를 수행할 수 있다. 오프가스를 감지할 수 있는 센서 및 감지 장치를 개발하여 차량 내부에 설치한 후, 미세한 오프가스를 차량 내부에 배출했을 때 화재 경고 알림이 정상적으로 작동하는지 테스트하는 연구를 진행할 수 있다. 이를 통해 주위 차량에 대한 손상을 최소화하고 탑승자의 생

명을 보장하기 위해 화재 발생 전 조짐을 신속하게 감지하고 경고하는 시스템을 연구할 수 있다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 자율주행기술개발혁신사업의 지원을 받아 수행되었다(20018101, T Car기반 자율주행 인지에측지능제어 차량부품시스템 통합평가 기술개발). 이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이다(No.2021R1A2C1005433). 이 논문은 BK21의 지원을 받아 수행된 연구이다(5199990814084). 이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구이다(P0017120, 2024년 산업혁신인재성장지원사업). 실험 설계에 도움을 준 서원준, 최보규 연구원, 실험 시나리오 구축에 도움을 준 좌호정, 전민하 연구원, 실험 데이터 분석에 도움을 준 김동환 연구원, 실험 진행에 도움을 준 김기훈, 장시아, 김민찬, 배이솔 연구원에게 감사드립니다.

References

- 1) In the First Half of the Year, There Were 42 Cases of Electric Vehicle Fires, Nearly Six Times the Count from the Previous Year. How Should We Respond to This Situation? <https://han.gl/fhEsbT>, 2023.
- 2) National Fire Research Institute. Guidelines for Responding to Electric Vehicle Fires, <https://han.gl/eMadVo>, 2021.
- 3) J. Kim and J. Yang, "Understanding Metrics of Vehicle Control Take-over Requests in Simulated Automated Vehicles," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.21, No.3, pp.757-770, 2020.
- 4) J. Lee, H. Yun, J. Kim, S. Baek, H. Han, S. M. FakhrHosseini, E. Vasey, O. Lee, M. Jeon and J. Yang, "Design of Single-modal Take-over Request in SAE Level 2 & 3 Automated Vehicle," *Transactions of KSAE*, Vol.27, No.3, pp.171-183, 2019.
- 5) S. Hong, J. W. Kim, S. J. Baek and J. Yang, 'Simulator Study on Take-over Request in Partially Automated Vehicle Using Auditory and Haptic Modality,' *Transactions of KSAE*, Vol.28, No.6, pp.401-411, 2020.
- 6) S. Petermeijer, P. Bazilinsky, K. Bengler and J. Winter, "Take-over Again: Investigating Multimodal and Directional TORs to Get the Driver Back into the Loop," *Applied Ergonomics*, Vol.62, pp.204-215, 2017.
- 7) I. Politis, S. Brewster and F. Pollick, "Language-Based Multimodal Displays for the Handover of Control in Autonomous Cars," *Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, pp.3-10, 2015.
- 8) J. Kwon, S. Jeong, D. Ju, "Preference of Center Information Display Size and Location Based on Autonomous Driving Level," *Proceedings of HCI Korea*, Vol.14, No.1, pp.45-52.12, 2019
- 9) T. Dukic, L. Hanson and T. Falkmer, "Effect of Drivers' Age and Push Button Locations on Visual Time off Road, Steering Wheel Deviation and Safety Perception," *Ergonomics*, Vol.49, No.1, pp.78-92, 2006.
- 10) J. Ostlund, L. Nilsson, J. Tornros and A. Forsman, "Effects of Cognitive and Visual Load in Real and Simulated Driving," *VTI Rapport 533A*, VTI, Linkoping, Sweden, 2006.
- 11) M. Mulder, D. A. Abbink and E. R. Boer, "The Effect of Haptic Guidance on Curve Negotiation Behavior of Young, Experienced Drivers," *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Singapore, 2008.